

Atty. Dkt. No.: 7781.0028-00
SAP Ref. No.: 2001-012

United States Patent Application

of

Norbert Trautmann
Bettina-von-Arnim Weg 7
D-76135 Karlsruhe
GERMANY

and

Christoph Schwindt
Rue des Akacias 15
F-67630 Neewiller
FRANCE

for

METHODS AND SYSTEMS FOR BATCH PROCESSING

LAW OFFICES

FINNEGAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

5

Verfahren zur Anlagenbelegungsplanung in der
Prozeßindustrie

10

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur automatisierten, computergestützten Anlagenbelegungsplanung in der Prozeßindustrie mittels eines integrativen Relaxationsansatzes für die Ablauf-Optimierung einer Chargenproduktion. Das Verfahren dient zum zeitlichen Zuweisen von Ressourcen zu einer im Rahmen einer Chargenplanung ermittelten Menge von Operationen. Die zu belegende Anlage ist dabei eine Mehrzweckanlage, mit der aus Rohstoffen mittels sukzessive ausgeführter chemischer und/oder physikalischer Transformationen Endprodukte hergestellt werden. Beispiele solcher Transformationsschritte sind chemische Reaktionen, Filtrieren, Mischen oder Verpacken. Die Operationen beanspruchen während ihrer Ausführung Ressourcen, und bei der Ausführung von Operationen sind produktionstechnische Randbedingungen zu berücksichtigen.

Zu der Prozeßindustrie zählen insbesondere die Chemie-, Pharma-, Nahrungsmittel-, Mineralöl-, Hütten- und Papierindustrie.

30

Die Erfindung richtet sich auf Anlagen, die im Chargenmodus betrieben werden, d.h., die zur Ausführung einer Operation benötigte Menge von Eingangsstoffen wird zu Beginn des Prozesses verbraucht und die von einer Operation produzierte Menge von Ausgangsstoffen steht mit dem Ende

LAW OFFICES

FINNEMAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

der Operation zur Verfugung. Eine solche Chargenproduktion ist insbesondere für chemische und pharmazeutische Produktionsanlagen typisch. Ein Vorteil der Chargenproduktion liegt in der Möglichkeit einer kostengünstigen 5 Herstellung verschiedenster Endprodukte auch in kleinen Mengen.

Die Produktionsplanung erfolgt in der Regel in zwei Stufen. Bei der Chargenplanung wird für jeden Transformationsschritt die Anzahl und Größe der einzelnen zu bearbeitenden Chargen bestimmt. Die Produktion einer Charge unter Verwendung von Ressourcen entspricht einer Operation. Die Aufgabe der nachfolgenden Anlagenbelegungsplanung ist die zeitliche Zuweisung von Ressourcen wie 10 Mitarbeitern, Lagern und Apparaten an die im Rahmen der Chargenplanung ermittelten Operationen. Die Anlagenbelegungsplanung ist also eine Reihenfolgeplanung für einen kurzfristigen Planungszeitraum. Sie wird auch als Scheduling oder Ablaufplanung bezeichnet. Sie kann unter 15 verschiedenen Zielvorgaben erfolgen, zum Beispiel der Minimierung der gesamten Produktionsdauer (Zykluszeit) oder der Minimierung der Überschreitung vorgegebener 20 Endtermine für einzelne Operationen.

25 Die Ausführung der Operationen erfolgt auf Mehrzweckanlagen, die Apparate und stoffspezifische Lager umfassen. Zur Bedienung der Apparate sind Mitarbeiter erforderlich, die verschiedene Qualifikationen aufweisen können. Zu Beginn einer Operation wird die zugehörige Menge von 30 Eingangsstoffen verbraucht, und zum Ende einer Operation muß die Menge nicht sofort weiterverarbeiteter Ausgangsstoffe gelagert werden.

35 Darüber hinaus kann es erforderlich sein, bei der Anlagenbelegungsplanung verschiedene produktionstechnische

Randbedingungen zu berücksichtigen. Beispielsweise kann für einzelne Stoffe eine Nachliege- oder Verfallszeit definiert sein, nach der sie frühestens bzw. spätestens weiterverarbeitet werden können oder müssen. Für jedes 5 Lager ist ein Mindest- und ein Höchstbestand vorgegeben, zwischen denen sich der Lagerbestand bewegen muß. Ferner ist die Gesamtverfügbarkeit der Ressourcen Apparate und Mitarbeiter immer begrenzt. Eine weitere Randbedingung kann dadurch gegeben sein, daß viele Ressourcen nur für 10 bestimmte Operationen einsetzbar sind. So können beispielsweise bestimmte Operationen nur von bestimmten Mitarbeitern auf bestimmten Apparaten ausgeführt werden.

Eine andere produktionstechnische Besonderheit kann darin 15 bestehen, daß Apparate zwischen der Ausführung einzelner Operationen umzurüsten sind. Eine solche Umrüstung kann beispielsweise eine Reinigung sein. Die Dauer der Umrüstung kann von der Reihenfolge abhängen, in der die Operationen ausgeführt werden. Hinsichtlich der Mitarbeiter 20 ist zu berücksichtigen, daß die zur Verfügung stehende Zahl im Zeitablauf schwanken kann. So stehen zum Beispiel während der Nachschichten in der Regel weniger Mitarbeiter zur Verfügung als während der Tagschichten.

25 Darüber hinaus kann die Ausführung der Operationen oft auf mehrere Arten erfolgen, die sich bezüglich beanspruchter Ressourcen und der Dauer voneinander unterscheiden können. Für die Ressourcen Apparate und Mitarbeiter können Pausen vorgegeben sein, während derer sie 30 nicht zur Durchführung von Operationen zur Verfügung stehen. Manche Operationen können mit Beginn der Pause unterbrochen werden und müssen dann unmittelbar nach der Pause fortgesetzt werden. Es gibt aber auch Operationen, die nicht unterbrochen werden dürfen.

35

Gesucht wird ein Anlagenbelegungsplan, d.h. eine Auswahl von Ressourcen sowie ein Start- und ein Endzeitpunkt für alle Operationen, wobei alle produktionstechnischen Randbedingungen erfüllt sind.

5

Teilaspekte der bei der Anlagenbelegungsplanung betrachteten Chargenproduktion können als ressourcenbeschränktes Projekt des Typs "multi-mode resource-constrained project scheduling problem with minimum und maximum time lags" dargestellt (modelliert) werden. Ein solches Projekt besteht aus einer Menge von Aktivitäten, die während ihrer Ausführung erneuerbare Ressourcen beanspruchen, zwischen deren Startzeitpunkten vorgegebene zeitliche Mindest- und Höchstabstände einzuhalten sind und deren Ausführung in einem von mehreren alternativen Modi erfolgen muß. Jede Aktivität entspricht bei dieser Modellierung einer Operation, d.h. der Produktion einer Charge. Verfalls- und Nachliegezeiten für Produkte werden durch zeitliche Mindest- und Höchstabstände zwischen den jeweiligen Aktivitäten modelliert. Zur Ausführung der Aktivitäten steht eine Menge von erneuerbaren Ressourcen zur Verfügung. Eine erneuerbare Ressource entspricht beispielsweise einer Gruppe von Mitarbeitern gleicher Qualifikation oder einer Gruppe identischer Apparate, die nicht umgerüstet werden. Die verfügbare Kapazität einer erneuerbaren Ressource ist konstant vorgegeben und entspricht der Anzahl Mitarbeiter oder Apparate, die durch sie abgebildet werden.

30 Jede Aktivität beansprucht während ihrer Ausführung so viele Einheiten der einzelnen erneuerbaren Ressourcen, wie zugehörige Mitarbeiter bzw. Apparate zur Ausführung der entsprechenden Aktivität erforderlich sind. Stehen in einem Zeitraum (z.B. während einer Nachschicht) weniger Mitarbeiter zur Verfügung, so wird dies durch zu-

35

FINNEGANT HENDERSON FARABOW GARRETT & DUNNER, L.L.P.

LAW OFFICES
FINNEGAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

sätzliche, durch Mindest- und Höchstabstände zeitlich fixierte fiktive Aktivitäten abgebildet, die die Differenz zwischen maximaler und tatsächlicher Verfügbarekeit beanspruchen. Für jede mögliche Ressourcenauswahl einer Operation wird ein Modus definiert. Die Inanspruchnahme der erneuerbaren Ressourcen und die Dauer der Aktivitäten hängt also vom gewählten Modus ab.

Eine zulässige Lösung eines solchen Projektplanungsproblems weist jeder Aktivität genau einen Modus sowie einen Startzeitpunkt zu, so daß die zeitlichen Mindest- und Hochstabstände zwischen den Operationen eingehalten sind und zu keinem Zeitpunkt mehr Kapazität einer erneuerbaren Ressource beansprucht wird als verfügbar ist.

Eine zulässige Lösung wird als optimal bezeichnet, wenn es keine zulässige Lösung des Projektplanungsproblems gibt, bei der das Projekt früher beendet wird.

Dieses aus dem Stand der Technik bekannte Projektplanungsproblem ist NP-schwer, d.h. nach heutigem Wissensstand nicht innerhalb einer als Polynom in der Problemgröße (Anzahl der Aktivitäten, Ressourcen und Modi) beschreibbaren Rechenzeit exakt lösbar. Ein bekannter Lösungsansatz für solche Projektplanungsprobleme, wie sie beispielsweise bei Baustellenplanungen, der Entwicklung von Software mit einer großen Anzahl beteiligter Entwickler oder der Planung von Meetings auftreten, stellt das Verfahren Heilmann 1998 dar. Bei diesem bekannten Verfahren wird das Problem zunächst relaxiert, d.h., es wird eine zulässige Lösung bestimmt, bei der nicht für jede Aktivität genau ein Modus ermittelt werden muß und bei der die Beschränkung der Kapazität erneuerbarer Ressourcen mißachtet werden darf. Man spricht von einem relaxierten Problem oder einer Relaxation, wenn einige oder

alle Nebenbedingungen eines Optimierungsproblems wegge-lassen oder durch schwächere Nebenbedingungen ersetzt werden.

5 Bei dem von Heilmann 1998 bekannten Verfahren zur Pro-
jektplanung wird die Relaxation gebildet, indem für jede
Aktivität die über alle Modi minimale Ausführungsduer,
minimale Inanspruchnahme erneuerbarer Ressourcen, klein-
sten zeitlichen Mindestabstände und größten zeitlichen
10 Höchstabstände angenommen werden. Das verbleibende Pro-
blem der Zeitplanung, d.h. der Ermittlung von Startzeit-
punkten für jede Aktivität, so daß die zeitlichen Min-
dest- und Höchstabstände eingehalten sind, die Kapazi-
tatsgrenzen erneuerbarer Ressourcen jedoch mißachtet wer-
15 den dürfen, entspricht dem bekannten Problem der Bestim-
mung längster Wege in einem Netzwerk. Verletzt die Lösung
dieses Zeitplanungsproblems zu einem Zeitpunkt die Be-
schränkung der Kapazität einer erneuerbaren Ressource, so
wird diese Verletzung beseitigt, indem Vorrangbeziehungen
20 zwischen den Aktivitäten eingeführt werden, die zu diesem
Zeitpunkt um die Kapazität der Ressource konkurrieren.
Anschließend wird erneut eine Zeitplanung unter
Berücksichtigung der zusätzlichen Vorrangbeziehung durch-
geföhrt. Wird keine Verletzung einer Ressourcenbeschrän-
25 kung festgestellt, so wird nach einer Aktivität gesucht,
für die noch kein Modus ausgewählt wurde. Ist für jede
Aktivität ein Modus ausgewählt worden, so hat man eine
zulässige Lösung erhalten. Ansonsten wird für eine Akti-
vität ein Modus festgelegt. Gibt es mehrere Möglichkei-
30 ten, Vorrangbeziehungen zwischen konkurrierenden Aktivi-
täten festzulegen oder für eine Aktivität einen Modus
festzulegen, so wird zunächst eine Möglichkeit ausgewählt
und mit dieser fortgefahren. Die übrigen Möglichkeiten
werden in Form eines Entscheidungsbaums gespeichert.

In dem bekannten Projektplanungsverfahren von Heilmann 1998 werden die Schritte Zeitplanung und Einführung von Vorrangbeziehungen bzw. Moduswahl wiederholt, bis eine zulässige Lösung gefunden wurde oder die bei der Zeitplanung zu berücksichtigenden Nebenbedingungen sich widersprechen. In beiden Fällen wird zur vorherigen Ebene im Entscheidungsbaum zurückgekehrt und eine andere Alternative betrachtet.

10 Ein dem aus Heilmann 1998 bekannten Verfahren zur Projektplanung (siehe auch Schwindt 1998 für den Fall ohne alternative Modi) vergleichbarer Lösungsansatz zur Durchführung einer Anlagenbelegungsplanung in der Prozeßindustrie mittels einer Modellierung und Relaxation ist im 15 Stand der Technik nicht bekannt.

20 Es ist bekannt, das Gesamtproblem der Anlagenbelegungsplanung als gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem zu formulieren und mit Hilfe von Standardsoftware zu lösen. 25 Dabei können alle produktionstechnischen Randbedingungen abgebildet und berücksichtigt werden. Der Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch, daß zur Lösung von Planungsproblemen realistischer Größe in der Regel Rechenzeiten im Bereich von Tagen bis zu mehreren Jahrzehnten oder mehr erforderlich sind.

30 Aus diesem Grund wurden im Stand der Technik Lösungsansätze vorgeschlagen, die sich auf Teilaspekte der Anlagenbelegungsplanung richten, die nicht in der Modellierung als Projektplanungsproblem nach Heilmann 1998 berücksichtigt werden können. Ein Beispiel hierfür ist die Literaturstelle Neumann & Schwindt 1999, wo Projektplanungsprobleme mit kumulativen Ressourcen ohne alternative Modi für Aktivitäten betrachtet werden. Eine kumulative Ressource ist von unten durch einen Mindestbestand und 35

von oben durch einen Höchstbestand begrenzt. Eine Aktivität kann kumulative Ressourcen positiv in Anspruch nehmen, d.h. den Bestand erhöhen, oder negativ in Anspruch nehmen, d.h. den Bestand verringern. Beschränkungen der 5 Lager (Mindest- und Höchstbestand) lassen sich mit Hilfe kumulativer Ressourcen abbilden.

Ein weiteres Beispiel aus dem Stand der Technik für Lösungsansätze, die sich auf Teilespekte der Anlagenbelegungsplanung richten, ist die Literaturstelle Franck 1999 10 zur Berücksichtigung von Ressourcenkalendern ohne alternative Modi für Aktivitäten. Ressourcenkalender definieren Zeiträume, zu denen erneuerbare Ressourcen nicht von Aktivitäten beansprucht werden dürfen. Mit Hilfe von Ressourcenkalendern lassen sich Produktionspausen abbilden. 15

Für den Fachmann überraschend führt jedoch die Hintereinanderausführung der bekannten Verfahren, zum Beispiel zuerst nach Heilmann 1998 und anschließend nach Neumann & 20 Schwindt 1999 und Franck 1999 nicht zu einer zulässige geschweige denn optimale Lösung darstellenden Anlagenbelegungsplan.

Darüber hinaus ist es bekannt, Anlagenbelegungsprobleme 25 als ressourcenbeschränkte Projektplanungsprobleme zu modellieren, beispielsweise aus Trautmann 1998a basierend auf Neumann & Schwindt 1997. Aus dem Stand der Technik ist aber für so modellierte Projektplanungsprobleme kein Lösungsverfahren bekannt. 30

Die aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren zur Anlagenbelegungsplanung sind auf Anlagen beschränkt, in denen Produkte in beliebiger Menge gelagert werden können und zur Verfügung stehen, bei denen die Apparate nicht zwischen verschiedenen Operationen umgerüstet werden 35

© 1999 FINNEGAN, HENDERSON, FARABOW, GARRETT & DUNNER, L.L.P.

LAW OFFICES
FINNEGAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

müssen und bei denen keine Produktionspausen zu berücksichtigen sind. Da diese Voraussetzungen bei der Planung der Belegung realer Anlagen in der Regel nicht gegeben sind, sind die aus dem Stand der Technik bekannten

5 Verfahren nur zur Lösung von Sonderfällen geeignet, stellen aber kein allgemein anwendbares Verfahren zur Lösung der Problemstellung einer Anlagenbelegungsplanung dar.

10 Aus dem Dokument WO 99/63471 ist ein Verfahren zur Anlagenbelegungsplanung mit beschränkten Ressourcen bekannt. Das bekannte Verfahren beruht auf der Anwendung des Prinzips der lokalen Suche mittels Prioritätsregelverfahren. Die Beschränkung von Lagern kann dabei nicht berücksichtigt werden.

15

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Anlagenbelegungsplanung zu schaffen, das zur Lösung realer Probleme geeignet ist und innerhalb einer im Vergleich zur Lösung gemischt-ganzzahliger Probleme kurzen Rechenzeit zu einer optimalen oder (bei Untersuchung nur eines Teils der Menge aller zulässigen Lösungen) guten zulässigen Lösung führt.

20

25 Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren mit den Merkmalen des beigefügten Anspruchs 1 gelöst. Bevorzugte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung mit zugehörigen Zeichnungen.

30

Bei einem erfindungsgemäßen Verfahren zum automatisierten, computergestützten Planen der Belegung einer Anlage in der Prozeßindustrie mittels eines integrativen Relaxationsansatzes für die Ablauf-Optimierung einer diskontinuierlichen Chargenproduktion und zum zeitlichen Zuweisen

35

von Produktionsressourcen zu einer im Rahmen einer Char-
genplanung ermittelten Menge von Operationen wird also
ein Anlagenbelegungsplan für eine Anlage ermittelt, die
eine Mehrzweckanlage ist, mit der aus Rohstoffen mittels
5 sukzessive ausgeführter chemischer und/oder physikali-
scher Transformationsschritte Endprodukte hergestellt
werden. Die Operationen beanspruchen während ihrer Aus-
führung Ressourcen, die mehrfach zur Verfüigung stehen
können. Bei der Ausführung von Operationen sind produk-
10 tionstechnische Randbedingungen zu berücksichtigen. Dem
Verfahren liegt die in der Literaturstelle Trautmann
1998a beschriebene bekannte Modellierung des Problems der
Anlagenbelegungsplanung als ressourcenbeschränktes Pro-
jektplanungsproblem zu Grunde. Das zu lösende Problem der
15 Anlagenbelegungsplanung wird unter Berücksichtigung der
produktionstechnischen Randbedingungen als ressourcenbe-
schränktes Projektplanungsproblem modelliert, bei dem
jede Operation einer Aktivität des Projekts entspricht,
für die ein Ausführungsmodus, ein Startzeitpunkt und ein
20 Endzeitpunkt festzustellen ist, die während ihrer Ausfüh-
rung erneuerbare Ressourcen (Mitarbeiter), umrüstbare
Ressourcen (Apparate) und kumulative Ressourcen (Lager)
in Anspruch nimmt, für die Beschränkungen vorgegeben
sind, und bei dem zwischen den Aktivitäten zeitliche Min-
25 dest- und Höchstabstände (Verfallszeiten, Nachliegezei-
ten, Freigabetermine, Fertigstellungstermine) einzuhalten
sind.

30 In einem ersten Schritt des Verfahrens wird zu dem modell-
ierten Problem zunächst eine das Ressourcenproblem ver-
einfachende Relaxation gebildet, bei der die Beschränkun-
gen der Verfügbarkeit von Ressourcen außer acht gelassen
werden und bei der productionstechnischen Randbedingungen
der Art zeitlicher Mindest- und Höchstabstände zwischen
35 Operationen und die productionstechnischen Randbedingun-

gen der Art von Produktionspausen berücksichtigt werden, die unabhängig von der Auswahl der Ressourcen für Operationen sind.

5 In einem zweiten Schritt wird für das relaxierte Problem der Anlagenbelegungsplanung das Problem der Zeitplanung des Anlagenbelegungsplans als Kalendrierungsproblem in Netzwerken mit Hilfe eines Iterationsverfahrens gelöst. Das Iterationsverfahren ist nach einem bevorzugten zusätzlichen Merkmal ein Label-Correcting-Verfahren, das beispielsweise aus der Literaturstelle Trautmann 1998a bekannt ist.

10

15 In einem dritten Schritt wird die Lösung des Zeitplanungsproblems auf ihre Zulässigkeit für das nicht relaxierte Problem der Anlagenbelegungsplanung untersucht. Wird dabei festgestellt, daß in der Lösung des Zeitplanungsproblems Beschränkungen der Verfügbarkeit von Ressourcen verletzt werden, so werden diese Verletzungen

20 durch Einführen von Vorrangbeziehungen gelöst. Wird dabei festgestellt, daß in der Lösung des Zeitplanungsproblems für die Ausführung einer Operation nicht alle Ressourcen gewählt wurden, so werden die Ressourcen gewählt.

25 Der zweite Schritt der Untersuchung der Zeitplanung unter Berücksichtigung der eingeführten Vorrangbeziehungen und der getroffenen Auswahlen von Ressourcen und der dritte Schritt der Einführung von Vorrangbeziehungen bzw. der Auswahl von Ressourcen werden fortgesetzt, bis ein zulässiger Anlagenbelegungsplan gefunden wurde oder bis sich die in dem zweiten Schritt der Zeitplanung zu berücksichtigen Nebenbedingungen widersprechen.

30

35 Wenn eine untersuchte Möglichkeit keine produktionstechnische Randbedingung verletzt, wird der Anlagenbelegungs-

LAW OFFICES

FINNEGAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

plan als zulässige Lösung gespeichert und mit dem Unter-
suchen noch nicht überprüfter Möglichkeiten gemäß dem
dritten Schritt fortgefahren. Aus den insgesamt in dem
zweiten Schritt ermittelten zulässigen Lösungen wird dann
5 eine beste Lösung bestimmt, wobei unterschiedliche in den
Endzeitpunkten der Operationen nichtfallende Zielfunktio-
nen als Kriterium dafür angewandt werden können, was als
beste Lösung gesucht wird.

10 Ein besonderer Vorteil der Erfindung gegenüber dem Stand
der Technik besteht darin, daß die Berücksichtigung von
Beschränkungen in Bezug auf Produktionspausen für Appa-
rate und Mitarbeiter, von Apparaten mit von der Reihen-
folge abhängigen Umrüstzeiten und von Lagern möglich ist.
15 Im Rahmen der Erfindung hat sich herausgestellt, daß der-
artige Beschränkungen nicht isoliert voneinander be-
trachtet werden können, also ein sukzessives Ausführen
der verschiedenen bekannten Verfahren zur Lösung von
Teilaspekten in der Regel nicht zu einem zulässigen, das
20 Anlagenproblem insgesamt lösenden Anlagenbelegungsplan
führt.

Es hat sich außerdem gezeigt, daß die Betrachtung aller
Nebenbedingungen bzw. produktionstechnischer Randbedin-
25 gungen im Rahmen der Erfindung deswegen möglich ist, weil
für die betrachteten auftretenden Konfliktarten unter-
schiedliche Vorgehensweisen zur Konfliktlösung eingeführt
werden können, die die gemeinsame Eigenschaft besitzen,
wieder zu einem Kalendrierungsproblem in Netzwerken zu
30 führen, das mit einem Iterationsverfahren, vorzugsweise
einem Label-Correcting-Verfahren gelöst werden kann. So-
wohl die letztere Erkenntnis als auch die Tatsache, daß
anders als bei einer sukzessiven Ausführung der einzel-
nen, Teilaspekte lösenden bekannten Verfahren die erfin-

LAW OFFICES

FINNEGAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

dungsgemäße simultane Betrachtung aller Nebenbedingungen zur Lösung führt, ist für den Fachmann überraschend.

Darüber hinaus hat das erfindungsgemäße Verfahren den

5 Vorteil, daß es nur vergleichsweise wenig Rechenzeit be-
ansprucht und innerhalb kurzer Zeit einen gesuchten Anla-
genbelegungsplan liefert. Das erfindungsgemäße Verfahren
hat den Vorteil, daß für Probleme zur Anlagenbelegungs-
planung mit einer in der Praxis relevanten Größe und Kom-
plexität, wobei etwa 100 bis 1.000 Operationen durchzu-
führen sind, innerhalb weniger Minuten Rechenzeit durch
ein entsprechendes Computerprogramm gute zulässige Lösun-
gen bestimmt werden können und nicht, wie bei den Verfah-
ren der gemischt-ganzzahligen Optimierung nach dem Stand
10 der Technik, nach mehreren Stunden Rechenzeit keine zu-
lässige Lösung gefunden wird. Das erfindungsgemäße Ver-
fahren läßt sich auf einem Computer beispielsweise als
sogenanntes Branch-and-Bound-Verfahren implementieren.

15 Die Erfindung liefert somit ein Verfahren zur effizienten
Anlagenbelegungsplanung in der Prozeßindustrie auf Basis
einer Erweiterung des von Heilmann 1998 für den Bereich
der Projektplanung bekannten Verfahren, wobei, anders als
im Stand der Technik, die bei praktischen Problemen der
Anlagenbelegungsplanung gegebenen komplexen realen pro-
20 duktionstechnischen Randbedingungen und Beschränkungen
von Ressourcen berücksichtigt werden können.

25 Das erfindungsgemäße Verfahren beruht grundsätzlich dar-
auf, daß zunächst eine Relaxation der Problemstellung be-
trachtet wird, in der die Beschränkungen der Verfügbar-
keit von Ressourcen außer acht gelassen werden. Für das
relaxierte Problem wird die Zeitplanung gelöst, wobei die
zeitliche Mindest- und Höchstabstände und Produktionspau-
30 sen beachtet werden. Wenn bei der Lösung des Zeitpla-

35

nungsproblems Beschränkungen der Verfügbarkeit von Ressourcen verletzt werden, so werden diese Verletzungen durch Einführung entsprechender Vorrangbeziehungen beseitigt. Je nach Typ der Ressource kann die Verletzung auf eine bestimmte geeignete Art festgestellt und durch eine geeignete Art von Vorrangbeziehung aufgelöst werden. Wenn festgestellt wird, daß für eine Operation noch keine Ressourcen (aus der produktionstechnisch gegebenen Menge alternativer Ressourcen) gewählt wurden, kann durch Einschränken der wählbaren Ressourcen eine Auswahl getroffen werden. Nach Einführung von Vorrangbeziehungen oder der Auswahl von Ressourcen wird eine erneute Zeitplanung unter Berücksichtigung der eingeführten Vorrangbeziehungen und der noch wählbaren Ressourcen durchgeführt.

Wenn es mehrere Möglichkeiten gibt, Vorrangbeziehungen zwischen konkurrierenden Operationen festzulegen oder für eine Operation Ressourcen zu wählen, so wird zunächst eine Möglichkeit ausgewählt und mit dieser fortgefahrene. Die übrigen Möglichkeiten können in Form eines Entscheidungsbaums gespeichert werden. Die Schritte Zeitplanung und Einführen von Vorrangbeziehungen bzw. Ressourcenauswahl werden wiederholt, bis ein zulässiger Anlagenbelegungsplan gefunden wurde, oder die bei der Zeitplanung zu berücksichtigenden Nebenbedingungen sich widersprechen, also in diesem Fall keine zulässige Lösung gefunden wird. In beiden Fällen wird zur vorherigen Ebene im Entscheidungsbaum zurückgekehrt und eine andere Alternative auf ihre Zulässigkeit untersucht.

Nach einem anderen vorteilhaften Merkmal wird vorgeschlagen, daß mehrere Möglichkeiten von Vorrangbeziehungen zwischen konkurrierenden Operationen in Form eines Entscheidungsbaums gespeichert werden. Zur Durchführung des Verfahrens mittels eines Computers kann es ferner vor-

teilhaft sein, wenn mehrere Möglichkeiten der Ressourcenauswahl in Form eines Entscheidungsbaums gespeichert werden.

- 5 Die in dem erfindungsgemäßen Verfahren betrachteten Ressourcen können eine oder mehrere der folgenden Ressourcen umfassen: Mitarbeiter gleicher Qualifikation, Apparate, Lager.
- 10 Nach weiteren vorteilhaften Merkmalen kann vorgesehen sein, daß eine oder mehrere der folgenden produktions-technischen Randbedingungen berücksichtigt werden: eine Nachliegezeit für Ausgangsstoffe, nach der sie frühestens weiterverarbeitet werden können, eine Verfallszeit für
- 15 Ausgangsstoffe, nach der sie spätestens weiterverarbeitet werden müssen, ein Freigabetermin für Eingangsstoffe, ein spätester Endtermin für Operationen, Beschränkungen der Verfügbarkeit von Ressourcen, eine Umrüstzeit für Apparate, die Abhängigkeit der Umrüstzeit von der Reihenfolge
- 20 der Operationen, die Abhängigkeit Verfügbarkeit der Ressource Mitarbeiter gleicher Qualifikation von der Zeit, Produktionspausen für Apparate und Mitarbeiter, der Mindestbestand und Höchstbestand von Lagern.
- 25 Im Rahmen der Erfindung ist es möglich, verschiedene Zielkriterien anzuwenden, um zulässige oder optimale Lösungen zu bewerten. In der Regel wird man bestrebt sein, die Zykluszeit, d.h. die Zeitspanne zwischen fest vorgegebenem Produktionsbeginn und Ende der letzten Operation,
- 30 zu minimieren. In anderen Varianten kann vorgesehen sein, daß die Termineinhaltung optimiert wird, d.h., es wird die durchschnittliche oder die maximale Überschreitung vorgegebener Endtermine für einzelne Operationen minimiert.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines in den Figuren dargestellten Ausführungsbeispiels näher erläutert. Die darin beschriebenen Besonderheiten können einzeln oder in Kombination miteinander eingesetzt werden, um bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung zu schaffen. Es zeigen:

Fig. 1 eine Übersicht über ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Anlagenbelegungsplanung in der Prozeßindustrie und

Fig. 2 Einzelheiten des Verfahrens in einem Flußdiagramm.

In Fig. 1 ist eine schematische Übersicht über das erfindungsgemäße Verfahren dargestellt. Zunächst wird das Optimierungsproblem der Anlagenbelegungsplanung in bekannter Weise modelliert. Zusätzlich zum Stand der Technik werden folgende Beschränkungen berücksichtigt:

- 1) Die Unterbrechbarkeit von Operationen. Dies kann gemäß der Literaturstelle Trautmann 1998b erfolgen, wo beschrieben ist, wie sich der Endzeitpunkt einer Operation als Funktion von Startzeitpunkt, der Dauer und der Pausen darstellen lässt. Wird dagegen eine in einem Verfahren, wie es aus der Literaturstelle Heilmann 1998 bekannt ist, erhaltene Lösung gemäß der Literaturstelle Trautmann 1998b kalendriert, so erhält man, anders als bei dem erfindungsgemäßen Verfahren, in der Regel keinen zulässigen Anlagenbelegungsplan.
- 2) Außer Mitarbeitern gleicher Qualifikation (erneuerbare Ressourcen) werden auch Beschränkungen von Lägern betrachtet, die als kumulative Ressourcen modelliert werden.

liert werden. Dies kann entsprechend der Literatur-
stelle Neumann & Schwindt 1999 erfolgen. Der Bestand
einer kumulativen Ressource zu einem Zeitpunkt ergibt
sich als Summe der Zu- und Abgänge bis zu diesem
Zeitpunkt. Für eine kumulative Ressource ist ein
zeitlich konstanter Höchst- und ein zeitlich konstan-
ter Mindestbestand vorgegeben.

Wenn eine Operation Ausgangsstoffe einem Lager zu-
fuhrt, so hat die entsprechende Aktivität eine posi-
tive Inanspruchnahme der entsprechenden kumulativen
Ressource zu ihrem Endzeitpunkt. Entnimmt eine Ope-
ration aus einem Lager Eingangsstoffe, so hat die
entsprechende Aktivität eine negative Inanspruchnahme
zu ihrem Endzeitpunkt. Ein Anlagenbelegungsplan wird
als lagerzulässig bezeichnet, wenn zu keinem
Zeitpunkt der Bestand einer kumulativen Ressource den
Mindestbestand unterschreitet bzw. den Höchstbestand
überschreitet.

Es wird angemerkt, daß eine Lösung, die nach dem Ver-
fahren Heilmann 1998 erhalten wurde und mit dem in
Neumann & Schwindt 1999 beschriebenen Verfahren zur
Ablaufplanung bei kumulativen Ressourcen weiterbear-
beitet wird, anders als das erfindungsgemäße Verfah-
ren in der Regel keinen zulässigen Anlagenbelegungs-
plan liefert.

3) Neben Mitarbeitern gleicher Qualifikation und Be-
schränkungen der Lager werden Apparate mit reihenfol-
geabhängigen Umrüstzeiten betrachtet. Dies kann gemäß
der Literaturstelle Trautmann 1998a erfolgen. Mit
einer Umrüstressource wird ein Apparat modelliert.
Belegt eine Operation während ihrer Ausführung einen
Apparat, so nimmt sie während der Ausführung die Um-

DRAFT COPY
DO NOT DISTRIBUTE

rüstressource in Anspruch. Wenn zur Ausführung der Operation alternative Apparate zur Verfügung stehen, so kann dies durch entsprechende Modi der abgebildet werden. Zwischen der Ausführung zweier Operationen, die unmittelbar hintereinander auf dem gleichen Apparat ausgeführt werden, muß ausreichend Zeit verbleiben, damit der Apparat umgerüstet werden kann. Ein Anlagenbelegungsplan wird als umrüstzulassig bezeichnet, wenn zwischen zwei aufeinanderfolgenden, auf der gleichen umrustbaren Ressource ausgeführten Operationen ausreichend Zeit für die Umrüstung verbleibt.

Es wird angemerkt, daß eine Lösung, die nach dem Verfahren Heilmann 1998 erhalten wurde und mit einem Verfahren zur Anlagenbelegungsplanung mit reihenfolgeabhängiger Umrüstzeiten weiterbearbeitet wird, anders als das erfindungsgemäße Verfahren in der Regel keinen zulässigen Anlagenbelegungsplan liefert.

Zu Beginn des erfindungsgemäßen Verfahrens wird eine Relaxation der Problemstellung betrachtet, bei der nur ein Teil der produktionstechnischen Randbedingungen berücksichtigt wird, der unabhängig von der Ressourcenauswahl für einzelne Operationen ist, d.h. die in Bezug auf alle möglichen Auswahlen von Ressourcen minimale Dauer, die kleinsten zeitlichen Mindestabstände und die größten zeitlichen Höchstabstände, die kleinste Inanspruchnahme jeder erneuerbaren Ressource und jeder Umrüstressource, den höchsten Bestandsverlauf bezüglich der Mindest- und niedrigsten Bestandsverlauf bezüglich der Fassungsvermögen der Lager sowie die unabhängig von der Wahl des Modus zu berücksichtigenden Pausen.

LAW OFFICES

FINNEGAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

Die Zeitplanung ermittelt einen bezüglich des Zielkriteriums optimalen Anlagenbelegungsplan, ohne die Beschränkungen der Verfügbarkeit von Ressourcen zu beachten.

5 Dieser Anlagenbelegungsplan wird in dem Schritt "Enumeration" (Ressourcenauswahl und Konfliktlösung durch Behebung der Verletzungen von Ressourcenbeschränkungen) auf Konflikte, d.h. Verletzungen der Beschränkungen der Verfügbarkeit von Ressourcen untersucht. Zur Auflösung eines solchen Ressourcenkonflikts wird eine zusätzliche Vor-
10 rangbeziehung eingeführt, durch die eine nichtleere Menge von Operationen verzögert wird. Sind im aktuellen Anlagenbelegungsplan keine Ressourcenkonflikte mehr vorhanden, so wird für mindestens eine Operation eine Ressourcenauswahl vorgenommen. In beiden Fällen wird unter
15 Berücksichtigung der veränderten Mengen von alternativen Modi und der erweiterten Menge von disjunktiven Vorrangbeziehungen eine Zeitplanung durchgeführt.

20 Bei der Relaxation der Ressourcen des Problems der Anlagenbelegungsplanung werden die Nebenbedingungen der beschränkten Verfügbarkeit von Eingangsstoffen, Lagerplatz für Ausgangsprodukte, Mitarbeitern gleicher Qualifikation und Apparaten aufgehoben. Es hat sich überraschenderweise herausgestellt, daß das verbleibende Kalendrierungsproblem in Netzwerken effizient lösbar ist, wobei die Ermittlung einer optimalen Lösung keine Enumeration zulässiger Lösungen erfordert.
25

30 Das verbleibende Problem der Zeitplanung besteht in der Ermittlung eines Anlagenbelegungsplans, der alle zeitlichen Mindest- und Höchstabstände sowie die Produktionspausen für Apparate und Mitarbeiter einhält. Dieses Problem kann gelöst werden, beispielsweise mit einem Verfahren gemäß der Literaturstelle Trautmann 1998b. Es stellt
35 eine Erweiterung von Verfahren zur Berechnung längster

DRAFT DRAFT DRAFT DRAFT DRAFT DRAFT DRAFT

Wege in Netzwerken dar, wobei ausgenutzt wird, daß der Endzeitpunkt einer Operation eine effizient berechenbare Funktion von Startzeitpunkt, Dauer und Pausen ist.

5 Die in der oberen Hälfte in Figur 1 "Zeitplanung" dargestellten produktionstechnischen Randbedingungen stellen sozusagen "einfache" und die in der unteren Hälfte "Enumeration" dargestellten "schwere" Probleme dar.

10 In einem untersuchten Anlagenbelegungsplan wird der früheste Start- oder Endzeitpunkt einer Operation ermittelt, zu dem ein Konflikt auftritt. Diesbezügliche Einzelheiten und die Möglichkeiten der Konfliktauflösung werden im Zusammenhang mit Fig. 2 erläutert.

15 Die zulässigen Anlagenbelegungspläne werden durchlaufen (Enumeration über alle zulässigen Varianten), und die als zulässig gefundenen Anlagenbelegungspläne werden als Lösungsmenge gespeichert, unter denen unter Berücksichtigung des gewünschten Zielkriteriums die beste Lösung ermittelt werden kann.

20

25 In Fig. 2 sind Einzelheiten der bevorzugten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens insbesondere hinsichtlich der Konfliktlösung veranschaulicht. Nach dem Start des Verfahrens wird zunächst abgefragt, ob die Zeitplanung, d.h. das Kalendrierungsproblem in Netzwerken, lösbar ist. Falls ja, wird in bekannter Weise eine optimale Lösung zu der Zeitplanung ermittelt. Dann wird geprüft, ob der gefundene Anlagenbelegungsplan eine zulässige Lösung darstellt. Falls ja, wurde bereits die beste Lösung gefunden.

30

35 Falls in einem Anlagenbelegungsplan, der in dem dritten Schritt darauf untersucht wird, ob er eine zulässige Lö-

LAW OFFICES

FINNEGAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

sung darstellt, ein Konflikt auftritt, wird vorteilhaft-erweise der fruheste Start- oder Endzeitpunkt einer Ope-ration bestimmt, zu dem einer der folgenden Konflikte auftritt:

5 a) Der Bestand eines Lagers überschreitet den vorgegebe-nen Höchstbestand,

10 b) der Bestand eines Lagers unterschreitet den vorgege-benen Mindestbestand,

15 c) die Anzahl benötigter Mitarbeiter übersteigt die An-zahl zur Verfügung stehender Mitarbeiter,

20 d) die Kapazität durch Operationen und Umrustungen benö-tigter Mitarbeiter übersteigt die Anzahl zur Verfü-gung stehender Apparate,

25 e) eine Operation startet, für deren Ausführung noch nicht alle Ressourcen gewählt wurden.

Die Überprüfung der Konflikte a) bis e) kann prinzipiell in jeder beliebigen zeitlichen Reihenfolge durchgeföhrt werden. Im Rahmen der Erfindung hat sich herausgestellt, daß es bevorzugt ist, wenn die Überprüfung der Konflikte a) bis d) in der Prioritätsreihenfolge a) bis d) erfolgt.

Es hat sich herausgestellt, daß zur Entscheidung der Frage, welche Möglichkeit der Konfliktauflösung als näch-ste untersucht wird, ein hierarchisches Kriterium, in das die Summe aus Unzulässigkeiten bezüglich der Lager (Unterschreitungen der Sicherheitsbestände und Überschrei-tungen der Kapazitäten) und die Differenz zwischen der Summe der Endzeitpunkte aller Operationen vor und nach

LAW OFFICES

FINNNEGAN, HENDERSON,
PARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

Auflosung des Konflikts einfließen, am besten geeignet ist.

Der Konflikt e) kann zu einem geeigneten Zeitpunkt überprüft werden. Vorteilhaft ist es, wenn der Konflikt e) vor der Überprüfung der Konflikte a) bis d) oder nach der Überprüfung der Konflikte a) bis d) überprüft wird, wobei die letzte Ausführungsform bevorzugt ist.

Das Vorliegen eines Konflikts a) kann beispielsweise gemäß der Literaturstelle Neumann & Schwindt 1999 überprüft werden. Hierzu werden die Start- und Endzeitpunkte der Operationen aufsteigend sortiert. Anschließend wird für jedes Lager überprüft, ob zu jedem Start- bzw. Endzeitpunkt einer Operation die Summe aus bis zu dem jeweiligen Zeitpunkt stattgefundenen in Bezug auf alle möglichen Auswahlen von Ressourcen für alle Operationen maximalen Entnahmen und minimalen Zugänge den Höchstbestand überschreitet oder nicht.

Das Vorliegen eines Konflikts b) kann ebenfalls gemäß der Literaturstelle Neumann & Schwindt 1999 dadurch überprüft werden, daß die Start- und Endzeitpunkte der Operationen aufsteigend sortiert werden und anschließend für jede kumulative Ressource überprüft wird, ob zu jedem Start- bzw. Endzeitpunkt einer Operation die Summe aus bis zu dem jeweiligen Zeitpunkt stattgefundenen in Bezug auf alle möglichen Auswahlen von Ressourcen für alle Operationen minimalen Entnahmen und maximalen Zugängen den Mindestbestand unterschreitet oder nicht.

Das Vorliegen eines Konflikts c) kann entsprechend der Literaturstelle Heilmann 1998 dadurch überprüft werden, daß die Startzeitpunkte der Operationen aufsteigend sortiert werden. Anschließend wird für jede Gruppe von Mit-

arbeitern gleicher Qualifikation überprüft, ob zu einem Startzeitpunkt einer Operation die Summe der in Bezug auf alle möglichen Wahlen von Ressourcen für alle Operationen minimalen Inanspruchnahmen der Mitarbeiter durch die zu 5 diesem Zeitpunkt sich in Ausführung befindlichen Operationen größer als die verfügbare Anzahl ist oder nicht.

Das Vorliegen eines Konflikts d) kann entsprechend der Literaturstelle Trautmann 1998a dadurch überprüft werden, 10 daß die Startzeitpunkte der Operationen aufsteigend sortiert werden. Anschließend wird für jeden Apparat überprüft, ob für alle Paare von Operationen, die unabhängig von der Wahl der Ressourcen auf diesem Apparat ausgeführt werden, der zeitliche Abstand zwischen dem Ende der ersten Operation und dem Start der zweiten Operation zur 15 Umrüstung ausreicht oder nicht.

Das Vorliegen eines Konflikts e) kann entsprechend der Literaturstelle Heilmann 1998 dadurch überprüft werden, 20 daß für jede Operation die Menge der für sie noch möglichen Auswahlen von Ressourcen ermittelt wird und, wenn die Menge einelementig ist, die in der Menge enthaltene Auswahl von Ressourcen als getroffen angenommen wird.

25 Wenn kein Konflikt mehr gefunden wird, so ist der untersuchte Anlagenbelegungsplan zulässig, und es wird mit einer noch nicht untersuchten Möglichkeit fortgefahrt, 30 einen zuletzt ermittelten Konflikt aufzulösen. Sind alle Möglichkeiten untersucht, wird mit dem zweitjüngsten Konflikt fortgefahrt usw. Sind alle Möglichkeiten untersucht, Konflikte aufzulösen, ist das Verfahren beendet. Der gemäß den Zielvorgaben beste Ablaufbelegungsplan wird zurückgegeben.

CONFIDENTIAL

Im Falle des Auftretens eines Konflikts in einem untersuchten Anlagenbelegungsplan wird versucht, den Konflikt zu lösen. Dies kann bevorzugt dadurch erfolgen, daß eine Möglichkeit ausgewählt wird, zu versuchen, einen aufgetretenen Konflikt aufzulösen, wobei Vorrangbeziehungen eingeführt werden oder die zulässigen Auswahlen von Ressourcen eingeschränkt werden und die übrigen Möglichkeiten in einem Entscheidungsbaum gespeichert werden.

5 10 15 20 25 30 35

In einer vorteilhaften praktischen Umsetzung des erfindungsgemäßen Verfahrens geht die Anzahl der insgesamt untersuchten Möglichkeiten, einen Konflikt aufzulösen, ein. Bevorzugt werden in jedem Konflikt zunächst alle Arten der Konfliktlösung nach einem möglichst einfach zu berechnenden Bewertungsschlüssel sortiert und ein von der Problemgröße abhängiger Anteil aussortiert. Der verbleibende Teil wird nach den genannten Kriterien sortiert.

In einem Konfliktfall a) können die Möglichkeiten ermittelt werden, den Endzeitpunkt einer Operation, die bis zum Konfliktzeitpunkt in allen möglichen Auswahlen von Ressourcen den Bestand des Lagers, bei dem der Konflikt auftrat, erhöht hat, mindestens bis zum frühesten Startzeitpunkt einer Operation zu verzögern, die nach dem Konfliktzeitpunkt in allen möglichen Auswahlen von Ressourcen den Bestand des Lagers, in dem der Konflikt auftrat, verringert, und diese Möglichkeiten in Form von Vorrangbeziehungen gespeichert werden.

In einen Konfliktfall b) können die Möglichkeiten ermittelt werden, den Startzeitpunkt einer Operation, die bis zum Konfliktzeitpunkt in allen möglichen Auswahlen von Ressourcen den Bestand des Lagers, in dem der Konflikt auftrat, verringert hat, mindestens bis zum frühesten Startzeitpunkt einer Operation zu verzögern, der nach dem

Konfliktzeitpunkt in mindestens einer möglichen Auswahl von Ressourcen den Bestand des Lagers, in dem der Konflikt auftrat, erhöht hat, und diese Möglichkeiten in Form von Vorrangbeziehungen gespeichert werden.

5

In einem Konfliktfall c) können die Möglichkeiten ermittelt werden, den Startzeitpunkt einer Operation, die zum Konfliktzeitpunkt in allen möglichen Auswahlen von Ressourcen die Ressource Mitarbeiter gleicher Qualifikation, 10 bei der der Konflikt auftrat, beansprucht, mindestens bis zum frühesten Endzeitpunkt einer Operation zu verzögern, die zum Konfliktzeitpunkt in allen möglichen Auswahlen von Ressourcen die Ressource Mitarbeiter, in der der Konflikt auftrat, beansprucht, und diese Möglichkeiten in 15 Form von Vorrangbeziehungen gespeichert werden.

In einem Konfliktfall d) können die Möglichkeiten ermittelt werden, den Startzeitpunkt einer der beiden am Konflikt beteiligten Operationen bis mindestens zum Endzeitpunkt der anderen am Konflikt beteiligten Operation zugleich der Umrüstzeit zwischen den beiden Operationen zu verzögern und diese beiden Möglichkeiten in Form von Vorrangbeziehungen gespeichert werden.

20 25 In einem Konfliktfall e) können die Möglichkeiten ermittelt werden, die Menge der möglichen Auswahlen von Ressourcen einer zu einem Konfliktzeitpunkt startenden Operation auf ein Element einzuschränken, und diese Möglichkeiten in Form der eingeschränkten Mengen gespeichert 30 werden.

35 Es wird jeweils eine der Möglichkeiten ausgewählt, den Konflikt aufzulösen, und das Verfahren unter Berücksichtigung der zusätzlichen Vorrangbeziehungen und der Einschränkungen der Mengen auswählbarer Ressourcen fortge-

setzt. Die übrigen Möglichkeiten werden in einem Entscheidungsbaum gespeichert und später untersucht.

With the exception of the first, the other three are in the same order as in the original.

LAW OFFICES

FINNEGAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L. P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

5

Patentansprüche

1. Verfahren zur automatisierten, computergestützten Anlagenbelegungsplanung in der Prozeßindustrie mittels eines integrativen Relaxationsansatzes für die Ablauf-Optimierung einer diskontinuierlichen Chargenproduktion und
zum zeitlichen Zuweisen von Ressourcen zu einer im Rahmen einer Chargenplanung ermittelten Menge von Operationen,
wobei die Operationen während ihrer Ausführung Ressourcen beanspruchen, die mehrfach zur Verfügung stehen können, und wobei bei der Ausführung von Operationen produktionstechnische Randbedingungen zu berücksichtigen sind,
wobei das zu optimierende Problem der Anlagenbelegungsplanung unter Berücksichtigung produktionstechnischer Randbedingungen als ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem modelliert wird, bei dem jede Operation einer Aktivität des Projekts entspricht, für die ein Ausführungsmodus, ein Startzeitpunkt und ein Endzeitpunkt festzulegen ist, wobei Beschränkungen der Verfügbarkeit von benötigten Ressourcen und zeitliche Randbedingungen zu beachten sind,
in einem ersten Schritt zu dem modellierten Problem zunächst eine das Ressourcenproblem vereinfachende Relaxation gebildet wird, bei der die Beschränkungen der Verfügbarkeit von Ressourcen außer acht gelassen werden und bei der die produktionstechnischen Rand-

bedingungen der Art zeitlicher Mindest- und Höchstabstände zwischen Operationen und alle produktionstechnischen Randbedingungen der Art von Produktionspausen berücksichtigt werden, die unabhängig von der Auswahl der Ressourcen für Operationen sind,

5

in einem zweiten Schritt für das relaxierte Problem der Anlagenbelegungsplanung das Problem der Zeitplanung des Anlagenbelegungsplans als Kalendrierungsproblems in Netzwerken mit Hilfe eines Iterationsverfahrens gelöst wird,

10

wobei in einem dritten Schritt die Lösung des Zeitplanungsproblems auf ihre Zulässigkeit für das nicht relaxierte Problem der Anlagenbelegungsplanung untersucht wird,

15

wobei, wenn festgestellt wird, daß in der Lösung des Zeitplanungsproblems Beschränkungen der Verfügbarkeit von Ressourcen verletzt werden, diese Verletzungen durch Einführen von Vorrangbeziehungen gelöst werden, und

20

wenn festgestellt wird, daß für die Ausführung einer Operation nicht alle Ressourcen gewählt wurden, die Ressourcen gewählt werden,

der zweite Schritt der Zeitplanung und der dritte Schritt der Einführung von Vorrangbeziehungen bzw.

25

der Auswahl von Ressourcen fortgesetzt werden, bis ein zulässiger Anlagenbelegungsplan gefunden wurde oder bis die in dem zweiten Schritt der Zeitplanung zu berücksichtigenden Nebenbedingungen sich widersprechen,

30

wenn eine untersuchte Möglichkeit keine produktions-technische Randbedingung verletzt, der Anlagenbelegungsplan als zulässige Lösung gespeichert wird,

mit dem Untersuchen noch nicht überprüfter Möglichkeiten gemaß dem dritten Schritt fortgefahren wird und aus den in dem zweiten Schritt ermittelten zulässigen Lösungen eine bezüglich einer wahlbaren in den Endzeitpunkten der Operationen nichtfallenden Zielfunktion beste Lösung bestimmt wird.

- 5 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Möglichkeiten von Vorrangbeziehungen zwischen konkurrierenden Operationen in Form eines Entscheidungsbaums gespeichert werden.
- 10 3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Möglichkeiten der Ressourcenauswahl in Form eines Entscheidungsbaums gespeichert werden.
- 15 4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das in dem zweiten Schritt verwendete Iterationsverfahren ein Label-Correcting-Verfahren ist.
- 20 5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß in einem Anlagenbelegungsplan, der in dem dritten Schritt darauf untersucht wird, ob er eine zulässige Lösung darstellt, der früheste Start- oder Endzeitpunkt einer Operation bestimmt wird, zu dem einer der folgenden Konflikte auftritt:
 - a) der Bestand eines Lagers überschreitet den vorgegebenen Höchstbestand,
 - b) der Bestand eines Lagers unterschreitet den vorgegebenen Mindestbestand,
 - c) die Anzahl benötigter Mitarbeiter übersteigt die Anzahl zur Verfügung stehender Mitarbeiter,
- 25 30

LAW OFFICES

FINNEGAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

- d) die Anzahl durch Operationen und Umrüstungen benötigter Mitarbeiter übersteigt die Anzahl zur Verfügung stehender Apparate,
- 5 e) eine Operation startet, für deren Ausführung noch nicht alle Ressourcen gewählt wurden.
- 10 6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Überprüfung der Konflikte a) bis d) in der Prioritätsreihenfolge a) bis d) erfolgt.
- 15 7. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Überprüfung des Konflikts e) vor der Überprüfung der Konflikte a) bis d) erfolgt.
- 20 8. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Überprüfung des Konflikts e) nach der Überprüfung der Konflikte a) bis d) erfolgt.
- 25 9. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Vorliegen eines Konflikts a) dadurch überprüft wird, daß die Start- und Endzeitpunkte der Operationen aufsteigend sortiert werden und anschließend für jedes Lager überprüft wird, ob zu jedem Start- bzw. Endzeitpunkt einer Operation die Summe aus bis zu dem jeweiligen Zeitpunkt stattgefundenen in Bezug auf alle möglichen Auswahlen von Ressourcen für alle Operationen maximalen Entnahmen und minimalen Zugänge den Höchstbestand überschreitet oder nicht.
- 30 10. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Vorliegen eines Konflikts b) dadurch überprüft wird, daß die Start- und Endzeitpunkte der Operationen aufsteigend sortiert werden und anschließend für jedes Lager überprüft wird, ob zu jedem Start- bzw. Endzeitpunkt einer Operation die Summe aus bis
- 35

zu dem jeweiligen Zeitpunkt stattgefundenen in Bezug auf alle möglichen Auswahlen von Ressourcen für alle Operationen minimalen Entnahmen und maximalen Zugangen den Mindestbestand unterschreitet oder nicht.

5

11. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Vorliegen eines Konflikts c) dadurch überprüft wird, daß die Startzeitpunkte der Operationen aufsteigend sortiert werden und anschließend für jede Gruppe von Mitarbeitern gleicher Qualifikation überprüft wird, ob zu einem Startzeitpunkt einer Operation die Summe der in Bezug auf alle möglichen Wahlen von Ressourcen für alle Operationen minimalen Inanspruchnahmen der Mitarbeiter durch die zu diesem Zeitpunkt sich in Ausführung befindlichen Operationen größer als die verfügbare Anzahl ist oder nicht.

10

15

20

25

30

35

12. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Vorliegen eines Konflikts d) dadurch überprüft wird, daß die Startzeitpunkte der Operationen aufsteigend sortiert werden und anschließend für jeden Apparat überprüft wird, ob für alle Paare von Operationen, die unabhängig von der Wahl der Ressourcen auf diesem Apparat ausgeführt werden, der zeitliche Abstand zwischen dem Ende der ersten Operation und dem Start der zweiten Operation zur Umrüstung ausreicht oder nicht.

13. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Vorliegen eines Konflikts e) dadurch überprüft wird, daß für jede Operation die Menge der für sie noch möglichen Auswahlen von Ressourcen ermittelt wird und, wenn die Menge einelementig ist, die in der Menge enthaltene Auswahl von Ressourcen als getroffen angenommen wird.

14. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet,
daß in einem untersuchten Anlagenbelegungsplan, in
dem ein Konflikt auftritt, versucht wird, den Kon-
flikt zu lösen.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet,
daß eine Möglichkeit ausgewählt wird, zu versuchen,
einen aufgetretenen Konflikt aufzulösen, wobei Vor-
rangbeziehungen eingeführt werden oder die zulässigen
Auswahlen von Ressourcen eingeschränkt werden und die
ubrigen Möglichkeiten in einem Entscheidungsbaum ge-
speichert werden.

16. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet,
daß in einem Konfliktfall a) die Möglichkeiten ermit-
telt werden, den Endzeitpunkt einer Operation, die
bis zum Konfliktzeitpunkt in allen möglichen Auswah-
len von Ressourcen den Bestand des Lagers, bei dem
der Konflikt auftrat, erhöht hat, mindestens bis zum
frühesten Startzeitpunkt einer Operation zu verzö-
gern, die nach dem Konfliktzeitpunkt in allen mögli-
chen Auswahlen von Ressourcen den Bestand des Lagers,
in dem der Konflikt auftrat, verringert, und diese
Möglichkeiten in Form von Vorrangbeziehungen gespei-
chert werden.

17. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet,
daß in einem Konfliktfall b) die Möglichkeiten ermit-
telt werden, den Startzeitpunkt einer Operation, die
bis zum Konfliktzeitpunkt in allen möglichen Auswah-
len von Ressourcen den Bestand des Lagers, in dem der
Konflikt auftrat, verringert hat, mindestens bis zum
frühesten Startzeitpunkt einer Operation zu verzö-
gern, der nach dem Konfliktzeitpunkt in mindestens

© E.P. 80
Basis nach dem 1. Buch
Basis nach dem 2. Buch
Basis nach dem 3. Buch
Basis nach dem 4. Buch
Basis nach dem 5. Buch
Basis nach dem 6. Buch
Basis nach dem 7. Buch
Basis nach dem 8. Buch
Basis nach dem 9. Buch
Basis nach dem 10. Buch
Basis nach dem 11. Buch
Basis nach dem 12. Buch
Basis nach dem 13. Buch
Basis nach dem 14. Buch
Basis nach dem 15. Buch
Basis nach dem 16. Buch
Basis nach dem 17. Buch
Basis nach dem 18. Buch
Basis nach dem 19. Buch
Basis nach dem 20. Buch
Basis nach dem 21. Buch
Basis nach dem 22. Buch
Basis nach dem 23. Buch
Basis nach dem 24. Buch
Basis nach dem 25. Buch
Basis nach dem 26. Buch
Basis nach dem 27. Buch
Basis nach dem 28. Buch
Basis nach dem 29. Buch
Basis nach dem 30. Buch
Basis nach dem 31. Buch
Basis nach dem 32. Buch
Basis nach dem 33. Buch
Basis nach dem 34. Buch
Basis nach dem 35. Buch
Basis nach dem 36. Buch
Basis nach dem 37. Buch
Basis nach dem 38. Buch
Basis nach dem 39. Buch
Basis nach dem 40. Buch
Basis nach dem 41. Buch
Basis nach dem 42. Buch
Basis nach dem 43. Buch
Basis nach dem 44. Buch
Basis nach dem 45. Buch
Basis nach dem 46. Buch
Basis nach dem 47. Buch
Basis nach dem 48. Buch
Basis nach dem 49. Buch
Basis nach dem 50. Buch
Basis nach dem 51. Buch
Basis nach dem 52. Buch
Basis nach dem 53. Buch
Basis nach dem 54. Buch
Basis nach dem 55. Buch
Basis nach dem 56. Buch
Basis nach dem 57. Buch
Basis nach dem 58. Buch
Basis nach dem 59. Buch
Basis nach dem 60. Buch
Basis nach dem 61. Buch
Basis nach dem 62. Buch
Basis nach dem 63. Buch
Basis nach dem 64. Buch
Basis nach dem 65. Buch
Basis nach dem 66. Buch
Basis nach dem 67. Buch
Basis nach dem 68. Buch
Basis nach dem 69. Buch
Basis nach dem 70. Buch
Basis nach dem 71. Buch
Basis nach dem 72. Buch
Basis nach dem 73. Buch
Basis nach dem 74. Buch
Basis nach dem 75. Buch
Basis nach dem 76. Buch
Basis nach dem 77. Buch
Basis nach dem 78. Buch
Basis nach dem 79. Buch
Basis nach dem 80. Buch
Basis nach dem 81. Buch
Basis nach dem 82. Buch
Basis nach dem 83. Buch
Basis nach dem 84. Buch
Basis nach dem 85. Buch
Basis nach dem 86. Buch
Basis nach dem 87. Buch
Basis nach dem 88. Buch
Basis nach dem 89. Buch
Basis nach dem 90. Buch
Basis nach dem 91. Buch
Basis nach dem 92. Buch
Basis nach dem 93. Buch
Basis nach dem 94. Buch
Basis nach dem 95. Buch
Basis nach dem 96. Buch
Basis nach dem 97. Buch
Basis nach dem 98. Buch
Basis nach dem 99. Buch
Basis nach dem 100. Buch

LAW OFFICES
FINNEMAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

einer möglichen Auswahl von Ressourcen den Bestand des Lagers, in dem der Konflikt auftrat, erhöht hat, und diese Möglichkeiten in Form von Vorrangbeziehungen gespeichert werden.

5 18. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet,
daß in einem Konfliktfall c) die Möglichkeiten ermit-
telt werden, den Startzeitpunkt einer Operation, die
zum Konfliktzeitpunkt in allen möglichen Auswahlen
von Ressourcen die Ressource Mitarbeiter gleicher
Qualifikation, bei der der Konflikt auftrat, bean-
sprucht, mindestens bis zum frühesten Endzeitpunkt
einer Operation zu verzögern, die zum Konfliktzeit-
punkt in allen möglichen Auswahlen von Ressourcen die
Ressource Mitarbeiter, in der der Konflikt auftrat,
beansprucht, und diese Möglichkeiten in Form von Vor-
rangbeziehungen gespeichert werden.

10 19. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet,
daß in einem Konfliktfall d) die Möglichkeiten ermit-
telt werden, den Startzeitpunkt einer der beiden am
Konflikt beteiligten Operationen bis mindestens zum
Endzeitpunkt der anderen am Konflikt beteiligten Ope-
ration zuzüglich der Umrüstzeit zwischen den beiden
Operationen zu verzögern und diese beiden Möglich-
keiten in Form von Vorrangbeziehungen gespeichert
werden.

15 20. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet,
daß in einem Konfliktfall e) die Möglichkeiten ermit-
telt werden, die Menge der möglichen Auswahlen von
Ressourcen einer zu einem Konfliktzeitpunkt starten-
den Operation auf ein Element einzuschränken, und
diese Möglichkeiten in Form der eingeschränkten Men-
gen gespeichert werden.

20

25

30

35

LAW OFFICES

FINNEGAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600

21. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
daß die Zykluszeit optimiert, d.h. die Zeitspanne
zwischen fest vorgegebenem Produktionsbeginn und dem
Produktionsende, d.h. dem Ende der letzten Operation,
minimiert wird.
5
22. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
daß die durchschnittliche Terminüberschreitung, d.h.
10 die Summe der Differenzen zwischen Endzeitpunkten und
vorgegebenen Endterminen für einzelne Operationen mi-
nimiert wird.
23. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
15 daß die maximale Terminüberschreitung, d.h. die maxi-
male Differenz zwischen Endzeitpunkten und vorge-
gebenen Terminen für einzelne Operationen minimiert
wird.
24. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
daß die Summe aus mit beliebig wählbaren nichtnegati-
20 ven Faktoren gewichteten Zielkriterien Zykluszeit,
durchschnittliche Termineinhaltung und maximale Ter-
mineinhaltung minimiert wird.
25
25. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
daß die produktionstechnische Randbedingung der Ge-
30 samtverfügbarkeit der Ressourcen berücksichtigt wird.
26. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
daß die Ressourcen Gruppen von Mitarbeitern gleicher
Qualifikation umfassen.
27. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
35 daß die Ressourcen Apparate umfassen.

28. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Ressourcen Lager umfassen.
- 5 29. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die produktionstechnische Randbedingung einer Nachliegezeit für ein oder mehrere Ausgangsstoffe berücksichtigt wird, nach der sie fruestens weiterverarbeitet werden können.
- 10 30. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die produktionstechnische Randbedingung einer Verfallszeit für ein oder mehrere Ausgangsstoffe berücksichtigt wird, nach der sie spätestens weiterverarbeitet werden müssen.
- 15 31. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die produktionstechnische Randbedingung eines Freigabetermins für ein oder mehrere Eingangsstoffe berücksichtigt wird.
- 20 32. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die produktionstechnische Randbedingung eines spätesten Endtermins für eine oder mehrere Operationen berücksichtigt wird.
- 25 33. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die produktionstechnische Randbedingung von Produktionspausen für Apparate und Mitarbeiter berücksichtigt wird.
- 30 34. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die produktionstechnische Randbedingung der Verfügbarkeit von Ressourcen berücksichtigt wird.

35. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die produktionstechnische Randbedingung der beschränkten Einsetzbarkeit bestimmter Ressourcen für bestimmte Operationen berücksichtigt wird.
5
36. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die produktionstechnische Randbedingung einer Umrüstzeit für Apparate berücksichtigt wird.
- 10 37. Verfahren nach Anspruch 36, dadurch gekennzeichnet, daß die produktionstechnische Randbedingung der Abhängigkeit der Umrüstzeit von der Reihenfolge der Operationen berücksichtigt wird.
- 15 38. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Abhängigkeit der Verfügbarkeit der Ressourcen Mitarbeiter gleicher Qualifikation von der Zeit berücksichtigt wird.
- 20 39. Verfahren nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die produktionstechnische Randbedingung der Art der Produktionspausen berücksichtigt wird.
- 25 40. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die produktionstechnische Randbedingung von Mindeststand und Höchstbestand von Lagern berücksichtigt wird.
- 30 41. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Ressourcen eine oder mehrere der folgenden Ressourcen umfassen: Mitarbeiter, Apparate, Lager.
- 35 42. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß einer oder mehreren Operationen eine Menge alternativer Ausführungsvarianten zugeordnet ist, die sich

in Dauer, Inanspruchnahme von Ressourcen sowie verbrauchtem bzw. produziertem Material unterscheiden.

5 43. Computerlesbares Medium mit einem Computerprogramm-
produkt, das direkt in den internen Speicher eines
digitalen Computers geladen werden kann und das Soft-
warecodeabschnitte umfaßt, mit denen die Schritte
eines Verfahrens gemäß Anspruch 1 ausgeführt werden,
10 wenn das Produkt auf einem Computer läuft.

44. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
daß die Anlage eine Mehrzweckanlage ist, mit der aus
Rohstoffen mittels sukzessive ausgeführter chemischer
und/oder physikalischer Transformationsschritte
15 Endprodukte hergestellt werden.

5

Zusammenfassung

10 Zur Anlagenbelegungsplanung in der Prozeßindustrie wird
ein Verfahren nach einem integrativen Relaxationsansatz
vorgeschlagen, bei dem eine das Ressourcenproblem ver-
einfachende Relaxation gebildet wird und das relaxierte
Problem gelöst wird, wobei Zeitbeziehungen und Produk-
tionspausen berücksichtigt werden, und in der Lösung der
15 Relaxation enthaltene Konflikte durch Vorrangbeziehungen
zwischen Operationen und Auswahl von Ressourcen gelöst
werden.

20

(Fig. 1)

LAW OFFICES

FINNEGAN, HENDERSON,
FARABOW, GARRETT
& DUNNER, L.L.P.
STANFORD RESEARCH PARK
700 HANSEN WAY
PALO ALTO, CALIF. 94304
650-849-6600